



CIRAD-Forêt

IDEFOR

Département Forestier

**Bingerville - ABIDJAN - Anguédédou
République de Côte d'Ivoire**

FORMATION A LA VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE LIGNOCELLULOSIQUE

En collaboration avec le

**PÔLE REGIONAL AFRICAIN
DE THERMOCHIMIE**



Ademe



IEPF



LES ASPECTS TECHNOLOGIQUES DE LA COMBUSTION

Philippe Girard - Gérard Antonini

Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement ,
Montpellier , France
Université Technologique de Compiègne, France.

1 - DESCRIPTION GENERALE D'UNE CHAUDIERE

1.1 - DEFINITION

Le terme générique chaudière est utilisé pour désigner un générateur de vapeur. C'est pour simplifier, un échangeur conçu pour transformer l'eau en vapeur en utilisant une source de chaleur. Cette dernière, en ce qui nous concerne, est constituée des gaz de combustion du bois. Une chaudière comprend :

- le foyer au niveau duquel s'effectue la combustion,
- la chaudière, à proprement parler, où s'effectuent les échanges thermiques.

Une chaudière peut avoir deux utilisations :

- la production de chaleur pour des processus industriels (cuisson, séchage,...),
- la production d'énergie mécanique ou d'électricité.

1.2 - LES FLUIDES VECTEURS

Outre la vapeur qui est la plus communément recherchée, d'autres fluides peuvent être utilisés : eau chaude, eau surchauffée, huile thermique,... Le rôle du fluide vecteur est multiple :

- stockage de l'énergie produite,
- transport de cette énergie jusqu'aux "utilisateurs",
- transfert d'énergie soit direct, soit indirect par contact ou mélange.

1.3 - CRITERES DE SELECTION D'UNE CHAUDIERE

Les critères de sélection d'une chaudière se situent principalement au niveau :

Des intrants :

- caractéristique de la source de chaleur ou du combustible,
- température de l'eau d'alimentation,
- température de l'air de combustion.

Des sorties :

- pression et débit de vapeur,
- température de vapeur de surchauffe,
- température des gaz d'échappement.

1.4 - COMPOSITION TYPE D'UNE CHAUDIERE.

Une chaudière industrielle de type tube d'eau est typiquement constituée de :

- une chambre de combustion où s'effectuent les échanges principalement par radiation, entre les gaz de combustion et l'eau / la vapeur, 35 à 40 % de la chaleur échangée,
- éventuellement un surchauffeur où les échanges par radiation et convection permettent de surchauffer la vapeur, représentant 10 à 20 % des échanges,
- un faisceau de tubes dans lequel les échanges se font principalement par convection, constituant 40 à 50 % des échanges,
- un économiseur ou réchauffeur d'eau, où les échanges se font essentiellement par convection due à la chute de température des gaz (400 à 500 °C). Les échanges sont de l'ordre de 5%,
- quelquefois un réchauffeur d'air est installé pour préchauffer l'air de combustion, particulièrement important pour les combustibles à très forte humidité. Il ne se justifie économiquement que sur de grosses installations.

Le schéma ci-après représente une chaudière type.

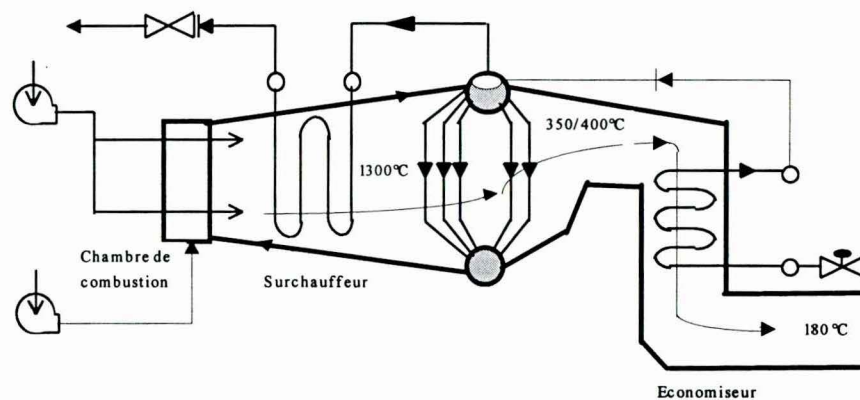


Schéma 1 : chaudière type

2 - NOTION DE RENDEMENT DES CHAUDIERES

C'est une des caractéristiques essentielles d'une chaudière ; la courbe de rendement pour différentes allures devrait être connue au même titre que les autres caractéristiques : surface de chauffe, de grille et puissance. Le rendement définit la qualité du type de chaudière, il représentera le quotient de la puissance utile recueillie à la puissance fournie, donné par la

formule suivante :

$$\text{Rendement} = n = \frac{Q_u}{Q_f}$$

On pourrait augmenter le rendement en accroissant la surface de chauffe, mais ceci serait au détriment du tirage, et la chaudière coûterait plus cher. Il y a un compromis à réaliser de manière à obtenir une chaudière d'un prix abordable, d'un tirage correct et avec un rendement acceptable.

Nous avons dit plus haut que le rendement était le quotient de la puissance recueillie à la puissance fournie : c'est donc en quelque sorte le "bilan comptable" des calories. La proportion des calories entrantes, sortantes, restantes, varie pour chaque appareil, mais le schéma des calculs reste le même. Remarquons, d'après la définition du rendement, qu'il n'est pas nécessaire de faire le "bilan" complet pour déterminer un rendement, mais le bilan a l'avantage de fournir d'autres renseignements intéressants. (cf. annexe)

2.1 - CHALEURS APPORTEES

La plus grande partie provient de la chaleur latente du combustible. En toute rigueur, il faudrait tenir compte de la chaleur du combustible (température de stockage différente), et de la température de l'air de combustion.

2.2 - CHALEURS UTILISEES

Si l'on appelle Q la quantité de chaleur fournie est donnée par la formule ci-après :

$$Q = P (T_d - T_r)$$

où :

- T_d est la température au départ de la chaudière,
- T_r est la température au retour,
- P le débit d'eau.

Pour un calcul de rendement, les deux déterminations ci-dessus suffiraient. Le bilan comportera en plus la détermination des pertes thermiques.

2.3 - CHALEURS PERDUES

Elles ont plusieurs origines :

- par imbrûlés solides : dues au combustible mal calibré dont les grains trop fins passent aux travers des vides de la grille, également dues aux particules solides entraînées dans les cendres. Le dosage se fait au laboratoire, après prélèvement d'un échantillon. Parfois des imbrûlés solides peuvent être entraînés dans les fumées,
- par conductibilité : par le sol des éléments de chaudières. Ces pertes sont très faibles, la chaudière étant en général montée sur une assise qui joue le rôle d'isolant,
- par imbrûlés gazeux : elles sont d'autant plus importantes que la combustion est mauvaise : formation de CO au lieu de CO₂,
- par chaleur sensible des gaz : ce sont de loin les pertes les plus importantes, notamment avec

les combustibles biomasse qui nécessitent un excès d'air important, augmentant par la même, les pertes,

- par les parois : elles sont en général assez faibles si l'isolation est bonne. Comme il est difficile de mesurer les températures superficielles, on détermine ces pertes par différence.

Les pertes calorifiques peuvent être réduites :

- par la combustion très poussée des cendres et mâchefers et sous certaines conditions par la réintroduction des imbrûlés dans le foyer,
- en provoquant une combustion complète, par l'apport d'air secondaire favorisant la turbulence,
- par la bonne isolation des parties de chaudières exposées à l'air libre et par interposition d'une couche isolante dans la maçonnerie,
- en poussant le plus loin possible le refroidissement et l'utilisation des gaz d'échappement et par la diminution de la quantité de ces gaz.

2.4 - CALCUL DU RENDEMENT DES CHAUDIERES

Les rendements instantanés des chaudières à biomasse sont généralement compris entre 70 et 85 %. Des formules simplifiées ont été mises au point pour obtenir approximativement, mais rapidement, les rendements des chaudières fuel. Celles-ci ne sont pas encore disponibles pour la biomasse. Un exemple de calcul de rendement de chaudière est donné en annexe. Le calcul des rendements met en évidence les principaux indicateurs permettant de caractériser le bon fonctionnement des chaudières. Ceux-ci concernent les caractéristiques des fumées résultant de la combustion. Un fonctionnement correct d'une chaudière automatique au bois correspond à des fumées dont :

- la teneur en oxyde de carbone (CO) n'excède pas 0,1 % (en volume),
- la teneur en dioxyde de carbone (CO₂) n'excède pas 8 à 11 % (en volume),
- la teneur en imbrûlés est comprise entre 0 et 2 sur l'échelle d'un appareil de mesure de l'indice Smoke Test de Baccharach,
- la température de gaz d'échappement est comprise entre 250 et 280 °C.

2.5 - FACTEURS INFLUENÇANT LES PERFORMANCES D'UNE CHAUDIERE

2.5.1 - Ratio / Air combustible

Pour tous les combustibles, il est possible de déterminer le volume exact d'air nécessaire pour la combustion. Dans la pratique, de l'air additionnel est nécessaire pour assurer une combustion complète. Lors de la conception d'un système de combustion, l'objectif est d'utiliser le minimum d'excès d'air compatible avec une bonne combustion. Cependant, l'ajustement parfait du volume d'air n'est pas suffisant, ce dernier doit être introduit et mélangé de façon adéquate au combustible. La plupart des chaudières fonctionnent avec un certain pourcentage d'excès d'air afin d'assurer l'apport correct d'oxygène. Cet excès d'air diminue la température de flamme et accroît les pertes par les fumées. Quelques causes à l'origine d'un excès d'air :

- l'absence de contrôle de combustion,
- pas de système d'alimentation forcée,
- des problèmes de brûleurs,
- des problèmes d'alimentation en combustible.

Si un défaut d'air est fourni, la température de flamme chute également par suite d'une combustion incomplète qui va se traduire par la production de CO et de fumée noire.

Exemple Chaudière fuel lourd :

Production de vapeur :	8 t/h
Rendement chaudière :	78 %
Température de fumée :	225 °C
Fonctionnement annuel :	6 000 h
Coût fuel lourd + additif :	0,15US \$ / kg

Un excès d'air de 40 % au lieu de 10 % représenterait une augmentation de coût en combustible de	12,000 US \$ / an
--	-------------------

2.5.2 - Composition du combustible.

Le ratio hydrogène sur carbone d'un combustible affecte de façon notable le rendement d'une chaudière. Les atomes d'hydrogènes forment des molécules d'eau qui, transformées en vapeur, augmentent ainsi les pertes (la vapeur ne peut être condensée).

2.5.3 - L'humidité du combustible

La présence d'eau libre dans le combustible va se répercuter directement sur le rendement de la combustion.

2.5.4 - Le taux de cendre du combustible.

Le taux de cendres d'un combustible doit être défini avec précision si une combustion efficace est recherchée. En effet, le meilleur échangeur possible devient rapidement inefficace s'il est couvert d'une pellicule isolante de cendres. Les cendres peuvent également atteindre leur point de fusion dans certain cas, provoquant de graves problèmes dans les chaudières.

2.5.5 - La qualité d'eau d'alimentation.

La faible qualité de l'eau d'alimentation des chaudières est une importante cause de perte de rendement. Elle peut entraîner une augmentation du volume de purge nécessaire, mais elle affecte surtout le coefficient d'échange. En favorisant la formation de dépôt sur les tubes si la qualité de

l'eau n'est pas suffisante elle va fortement affecter le rendement de la chaudière. Ces dépôts peuvent entraîner, à l'extrême, des détériorations irréversibles au niveau des chaudières. Quelques problèmes rencontrés au niveau des chaudières et leurs causes sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Problèmes	Origine
Dépôt	Minéraux dissous Présence de silice
Corrosion	Gaz dissous Ph
Encrassement	Particules en suspension

2.5.6 - Isolation

Les pertes dues aux radiations et à la convection doivent être minimisées par l'intermédiaire de l'isolation. L'épaisseur de l'isolation peut être définie par une optimisation entre le coût de l'isolant et l'augmentation en consommation du combustible consécutive aux pertes. Quand l'épaisseur augmente, le coût de l'isolation augmente tandis que le coût dû aux pertes diminue comme l'illustre la figure ci-contre.

3 - CONSOMMATION DE COMBUSTIBLE

Si l'on désigne par :

D : la quantité de vapeur produite à l'heure, en kg,

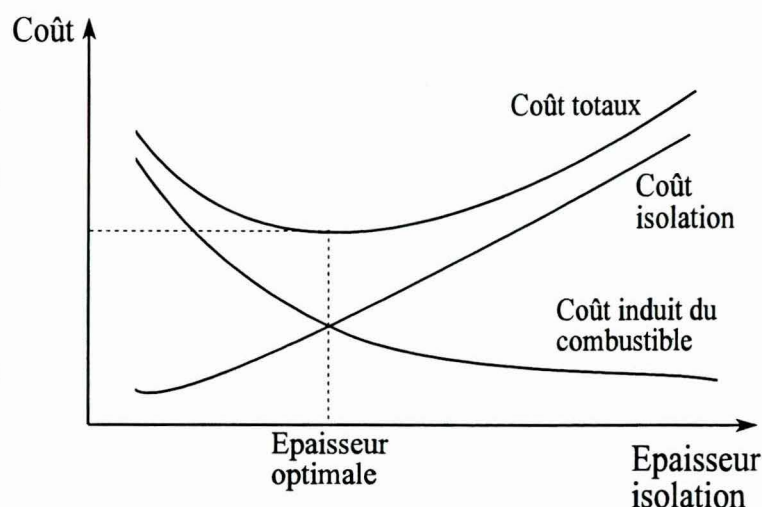
PCI : le pouvoir calorifique inférieur du combustible en kcal/kg ou Nm³,

id : la chaleur net par kg de vapeur,

Rt : le rendement de l'installation chaudière.

La formule suivante permet d'établir la consommation de combustible C :

$$C = \frac{D \cdot id}{PCIR_t} \text{ [Kg ou m}^3\text{N/h]}$$



4 - ASPECTS SPECIFIQUES DE LA COMBUSTION DE LA BIOMASSE

Les caractéristiques conditionnant le choix d'un foyer brûlant des produits végétaux et sa conduite sont les suivantes :

4.1 - LE POUVOIR CALORIFIQUE INTRINSEQUE DU COMBUSTIBLE

Le PCI relativement faible de la biomasse fait qu'il est nécessaire de maintenir une température de combustion relativement élevée, donc d'éloigner de la chambre de combustion les surfaces absorbantes de la chaudière.

4.2 - L'HUMIDITE DU COMBUSTIBLE

Au-delà de 50 % d'humidité sur poids total, une grande proportion de la chaleur est utilisée pour le séchage du déchet. Si, pour des raisons d'environnement par exemple, il est nécessaire de détruire le déchet, alors la combustion d'un déchet très humide peut s'envisager.

4.3 - LA TENEUR EN MATIERES VOLATILES DU COMBUSTIBLE

De 60 % à 80 % en moyenne, elle est responsable d'un dégagement violent de chaleur et de gaz dans le foyer. La propagation de la chaleur est très rapide avec trois conséquences principales :

- une combustion en deux étages avec apport d'air secondaire pour brûler les vapeurs qui se dégagent,
- un important excès d'air (40% en moyenne) pour assurer une combustion complète des goudrons contenus dans les vapeurs dégagées, afin d'éviter l'encrassement des surfaces de chauffe,
- la difficulté de régler le foyer à partir de l'alimentation en air de combustion ; le contrôle de la quantité de chaleur fournie se fera en réglant l'alimentation en combustible.

4.4 - LA FAIBLE DENSITE DU COMBUSTIBLE

Elle nécessitera un volume de foyer important et des dispositifs d'alimentation appropriés.

4.5 - LA NATURE DES CENDRES

Elles sont en général peu fusibles mais contiennent des alcalis et de la potasse, qui agissent comme fondants sur les matériaux réfractaires à haute température et les grilles. Il convient donc de prendre des précautions dans le choix et la disposition de ces derniers. Qualité des réfractaires, chambre de combustion de forte dimension, fonctionnement en basse température (800 à 900°C).

4.6 - LA GRANULOMETRIE

La granulométrie du produit va déterminer le choix de la technique de combustion et de convoyage du produit.

4.7 - LES REACTIONS DE COMBUSTION

L'originalité de la biomasse combustible est sa combustion en deux temps : dégagement de produits volatils et combustion de ceux-ci, puis combustion du résidu charbonneux.

L'air comburant devra donc être admis à deux niveaux :

- l'air primaire traversant la couche du combustible et destiné à assurer la pyrolyse du bois, la combustion des pyroligneux et du charbon de bois,
- l'air secondaire destiné à brûler les gaz issus de la pyrolyse qui n'auraient pas réagi avec l'air primaire.

Cet air doit être aussi chaud que possible et être réparti dans la masse de gaz à brûler de façon à assurer un mélange air-gaz le plus intime possible.

4.8 - LES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

Pour la combustion de biomasse, les solutions suivantes sont observées :

- le volume du foyer est plus important,
- la vitesse de passage des gaz dans les faisceaux de la chaudière est augmentée, d'où augmentation des pertes de charges,
- une chaudière fuel est déclassée de 15 à 40 % si elle est utilisée pour le bois en fonction des caractéristiques de celui-ci,
- il est nécessaire de prévoir un cyclofiltre pour éliminer les cendres volantes, voire les imbrûlés, d'où augmentation des pertes de charges,
- l'excès d'air est plus important dans le cas de la biomasse que dans celui de fuel :
 - . 70 à 100 % dans les foyers à grille à gradin,
 - . 60 à 140 % dans les cas courants.

Dans le cas de combustion de biomasse humide et lorsque la chaudière ne fonctionne pas à puissance nominale, c'est à dire à bas régime, le risque d'obtenir des points de condensation pouvant entraîner une dégradation de la chaudière est important ; c'est le phénomène de bistrage.

Le bistrage est une condensation des produits de pyrolyse n'ayant pas réagi avec l'air comburant sur les conduits de fumées. Le bistrage apparaît lorsque les fumées et les conduits de fumées sont froids. On a alors condensation de la vapeur d'eau contenue dans les fumées entraînant les goudrons, les acides et les particules carbonées imbrûlées. Ce phénomène apparaît essentiellement à l'allumage. Il y a un dégagement important de produits volatils. La température des fumées atteignant les conduits est encore basse et les parois des conduits sont froides. Ces inconvénients peuvent être réduits :

- par un choix judicieux de la chaudière qui doit être adaptée :
 - . au combustible à brûler (humidité),
 - . aux besoins calorifiques : une chaudière surdimensionnée ne peut fonctionner à son régime optimum, la qualité de la combustion s'en ressent.
- par une alimentation régulière en combustible : les dégagements des produits volatils sont plus réguliers et moins importants. La température dans le foyer et dans la cheminée sera moins fluctuante,
- par un conduit de fumées adapté : il faut qu'il reste chaud le plus longtemps possible. Ses

parois doivent être suffisamment isolées. De plus, les fumées doivent être animées d'une vitesse suffisante pour qu'elles n'aient pas le temps de se refroidir exagérément : la section du conduit ne doit pas être trop grande.

Pour éviter la condensation à l'intérieur même de la chaudière, il est recommandé de maintenir la température des chaudières à un niveau relativement élevé : 80 à 85 °C départ eau chaude.

5 - LES CENTRALES A VAPEURS

On peut distinguer les équipements au niveau desquels se fait la combustion à proprement parler et la chaudière.

5.1 - LES EQUIPEMENTS DE COMBUSTION ET LEURS DOMAINES D'APPLICATION

Les caractéristiques physico-chimiques de la biomasse à utiliser et le domaine d'utilisation envisagé, ont conduit au développement de nombreux modes de combustion :

- combustion sur grille fixe,
- combustion sur grille mobile avec alimentation posée du combustible,
- combustion sur grille avec alimentation projetée du combustible,
- combustion en lit fluidisé,
- combustion en suspension.

5.1.1 - Combustion sur grille fixe

Ce mode de combustion est le plus simple applicable à la biomasse. Le combustible est déposé sur un plan de grille fixe. L'air de combustion passe au travers de la couche de combustible formée sur le plan de grille. De nombreuses améliorations ont permis d'appliquer ce mode de combustion à des générateurs largement automatisés qui permettent d'éviter la stagnation des déchets de combustion et facilitent l'alimentation permanente du combustible. Les équipements adaptés à ce mode de combustion sont simples, peuvent être robustes, et ne nécessitent pas un personnel d'entretien important ni de haute qualification.

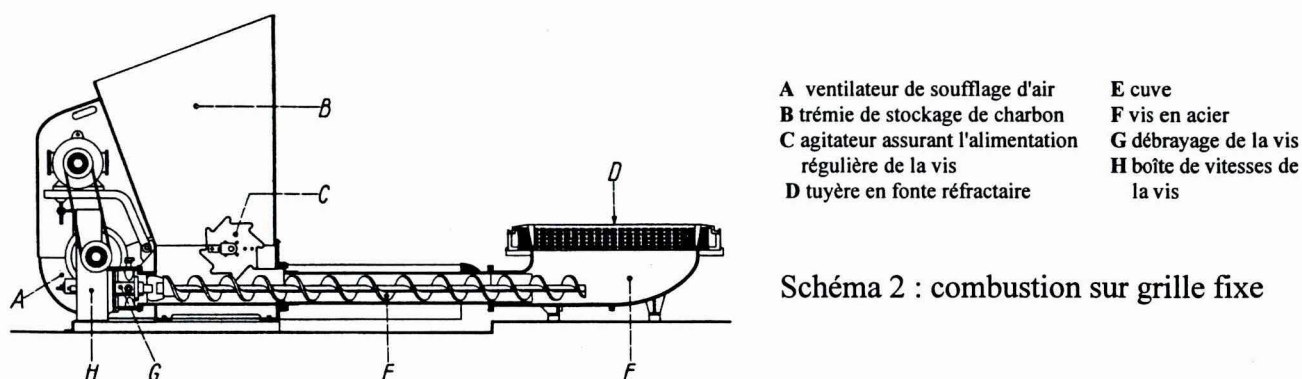


Schéma 2 : combustion sur grille fixe

Ils conviennent dans le domaine industriel au chauffage :

- de générateurs de gaz chauds utilisés pour le séchage de produits divers,
- d'incinérateurs avec ou sans récupération de chaleur,
- de générateurs de vapeur ayant des caractéristiques basses ou moyennes et ne nécessitant pas des variations de charges importantes et fréquentes.

Dans le cas des combustibles lignocellulosiques : combustibles d'origine végétale, déchets de végétaux, ordures ménagères, on fait souvent appel à des grilles à panneaux effaçables ou oscillants et à des grilles inclinées. Avec ce mode de combustion la puissance thermique maximale est considérée comme limitée à 25 MW environ.

5.1.2 - Combustion sur grille mobile avec alimentation posée du combustible

Dans ce mode de combustion, la grille fait avancer le combustible qui est admis à l'une de ses extrémités, tandis que les déchets de combustion sont évacués à l'extrémité opposée. Le combustible déposé en continu sur toute la largeur de la grille forme sur celle-ci une couche qui est traversée par l'air comburant. Ce mode de combustion convient parfaitement à un grand nombre d'applications dans le domaine industriel et à la plupart des combustibles solides. Les équipements sont à mécanisation simple et robuste et à faibles coûts d'entretien et d'exploitation.

Ils conviennent au chauffage :

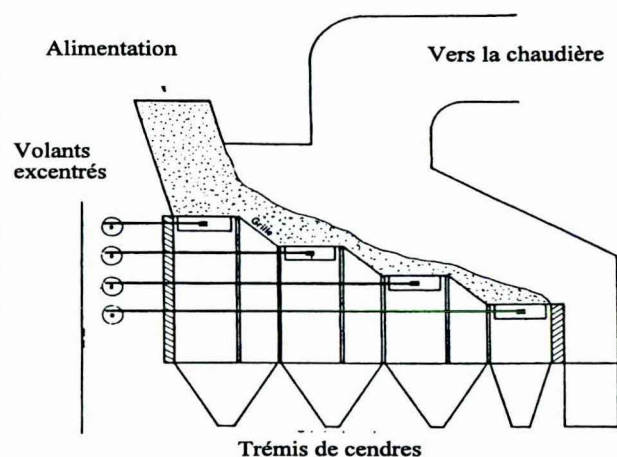
- de générateurs de gaz chauds utilisés pour le séchage de produits divers,
- de générateurs de vapeur utilisée pour le chauffage, dans des procédés, enfin pour la production d'électricité,
- d'incinérateurs avec ou sans récupération de chaleur.

Avec ce mode de combustion, on peut atteindre des puissances thermiques de l'ordre de 120 MW. Les générateurs disposant de ce mode de combustion sont en général largement automatisés.

Les différents principes sont les suivants :

- le foyer à grille basculante est souvent utilisé pour des unités de petite taille ou de taille moyenne. Il s'agit d'une grille stationnaire (voir schéma 3) dont les barreaux sont mobiles de telle sorte qu'en basculant de 90°, ils puissent déverser les cendres. Une section peut être utilisée en décentrage pendant que la combustion continue dans les autres sections.

Schéma 3 : foyer à grille basculante



- la grille vibrante (schéma 4) est souvent utilisée pour les déchets de bois. Son taux de combustion est plus élevé que celui de la grille basculante. Le lit de combustible glisse vers le bas de la grille lorsque celle-ci est animée de vibrations intermittentes créées par un volant excentré au bout de la grille, le combustible sèche et brûle lorsqu'il avance le long de la grille et les cendres sont déchargées dans une trémie.

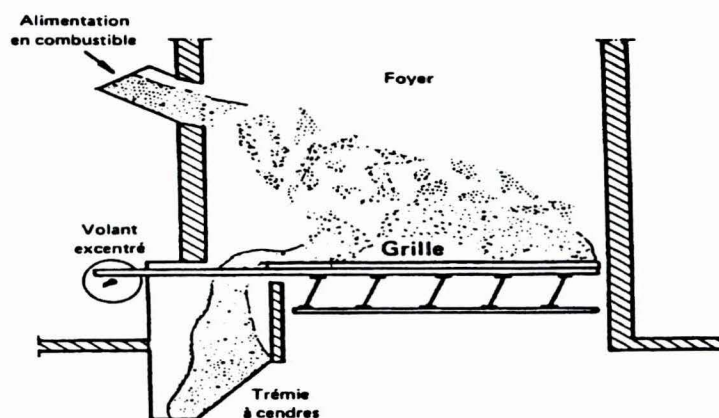


Schéma 4 : grille vibrante

- une grille à mouvement réciproque est en général légèrement inclinée. Le schéma 5 montre une telle grille de type KABLITZ. Celle-ci est divisée en sections séparées, chacune d'elles étant équipée de son propre volant. L'avantage de ce type de grille est qu'elle convient bien pour brûler des combustibles "difficiles" comme la tourbe, mais son prix est assez élevé.

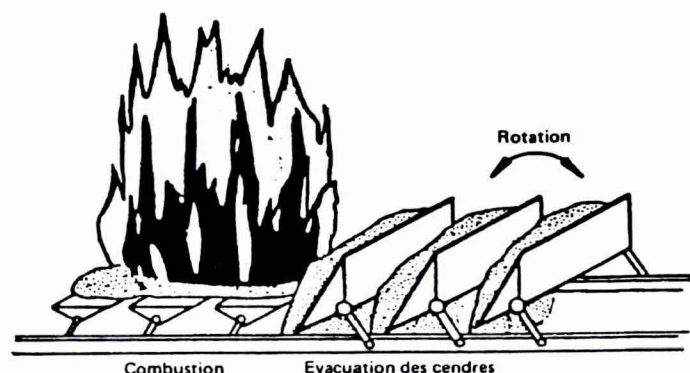


Schéma 5 : grille à mouvement réciproque

- grilles inclinées, elles sont largement utilisées dans les chaudières modernes à bois. Le principe opératoire est le même pour toutes ces grilles bien qu'il existe des différences dans les conceptions : barreaux horizontaux ou longitudinaux, inclinaison variable ou pas... Le combustible est alimenté en haut de la grille et glisse vers le bas. Il sèche, s'allume et brûle. Les cendres sont récupérées en bas de grille.

Dans certains cas, des grilles additionnelles sont ajoutées pour achever la combustion. Cela coûte cher. L'humidité maximale est de l'ordre de 55 à 66 % ; elle est fonction de la conception de la grille

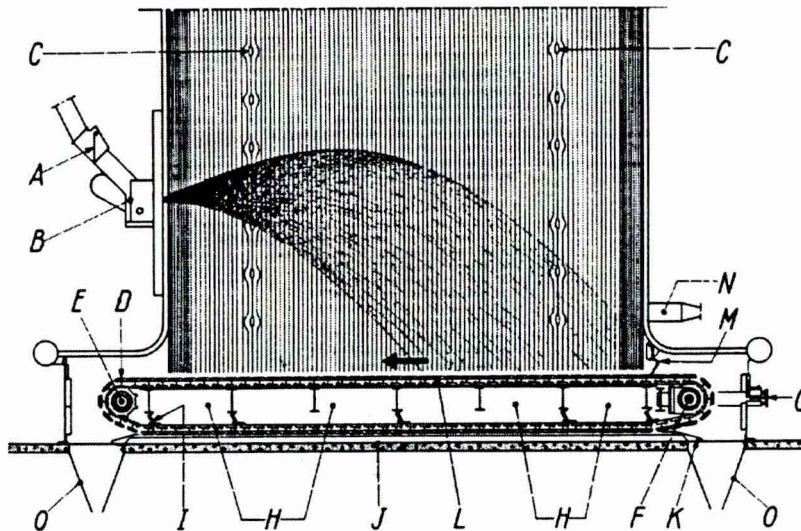
Les grilles à barreaux horizontaux comme les grilles inclinées à trous d'épingle ne conviennent qu'aux combustibles secs.

Cette configuration a été utilisée depuis de nombreuses années pour des installations de petite dimension. Actuellement on assiste à son développement pour des tailles supérieures à 200 t/h de vapeur avec un système automatique d'extraction par raclage. Une conception plus moderne a été réalisée avec deux grilles, l'une inclinée à trous d'épingles refroidie à l'eau, l'autre refroidie à l'eau et à mouvement réciproque. Le combustible glisse plus facilement. L'air de combustion est admis principalement par les trous des grilles et en faible quantité au-dessus pour assurer une combustion complète.

5.1.3 - Combustion sur grille avec alimentation projetée du combustible

Le combustible est projeté sur toute la section transversale du foyer (schéma 6). La combustion se déroule en deux stades :

- les particules les plus lourdes tombent et brûlent sur une grille,
- les particules les plus fines, entraînées par les gaz de combustion, brûlent en suspension dans la chambre de combustion.



- | | | |
|---|--|--|
| A clapet antiretour des gaz de combustion | G dispositif de tension | L couple thermoélectrique de contrôle de la température du métal |
| B alimenteurs-projecteurs | H caisson divisé d'air primaire sous la grille | M pendulaire de retenue du combustible |
| C air secondaire au dessus de la grille projeté | I patins d'air d'étanchéité | N boîte d'injection des particules recyclées |
| D grille mobile à chaîne tirée | J réserve de sable d'étanchéité | O évacuation des mâchefers et des fines |
| E arbre de commande de la grille | K rails supportant la grille sur le retour | |
| F arbre de tension de la grille | | |

Schéma 6 : Installation de combustion par alimentation projetée du combustible

Avec ce mode de combustion, il est possible de couvrir la gamme des besoins industriels :

- générateur de gaz chauds de séchage de produits divers,
- générateurs de vapeur nécessaire au chauffage (urbain ou autre), ou entrant dans les procédés de fabrication les plus divers,
- générateurs de vapeur de centrales de production d'électricité de dimensions correspondant aux besoins de villes importantes,
- incinérateurs avec récupération de chaleur.

Les équipements déjà en service permettent la réalisation de puissances de 230 MW.

Les combustibles de récupération transformés en granulés tels que : les ordures ménagères et les combustibles sous-produits de la transformation saisonnière de végétaux (**comme la bagasse**) peuvent aussi être utilisés. Une automatisation relativement développée est applicable aux équipements de ce mode de combustion.

5.1.4 - Combustion en lit fluidisé

Le lit de combustible est traversé par l'air de combustion. Pour une plage de vitesse de l'air donnée, il y a fluidisation du lit. Le lit parfaitement fluidisé est alors homogène. Il est dans un état comparable à un fluide et toute quantité de combustible introduite en un point quelconque (dans ou au-dessus du lit) se répartit dans l'ensemble du lit sans modifier son homogénéité. Ce mode de combustion peut être appliqué à des générateurs dont la capacité calorifique est de grande taille et à ceux convenant plus particulièrement aux centrales de production d'électricité. Tous les combustibles solides, fragmentés à une granulométrie convenable, peuvent être brûlés suivant ce mode de combustion.

6 - LES GENERATEURS DE VAPEUR

Le choix du type de chaudière industrielle à retenir par un utilisateur potentiel peut se faire en fonction de plusieurs critères, le principal étant d'abord la puissance thermique à fournir, ou son équivalent en production vapeur :

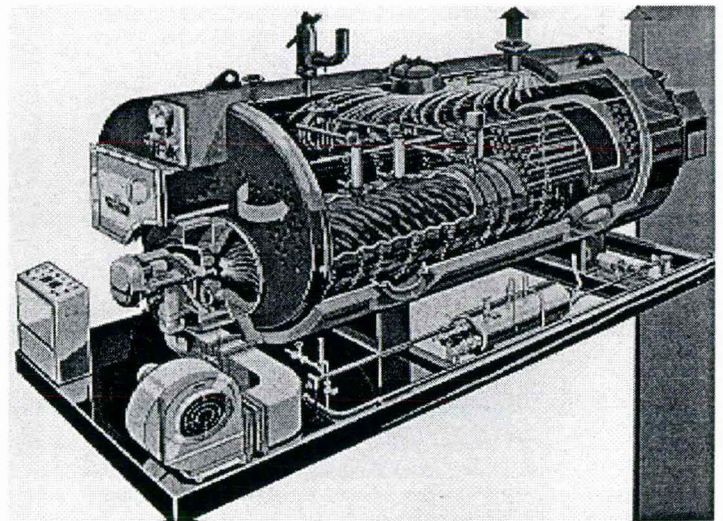
- **au dessous de 20 t/h** de production de vapeur, il existe une très grande variété de modèles de chaudières, à tubes de fumées ou à tubes d'eau, à circulation naturelle ou forcée. Leur timbre est limité le plus souvent à 12 ou 18 bars. Elles produisent seulement de la vapeur saturée. La généralisation de la cogénération nécessitant de la vapeur surchauffée a conduit les industriels à proposer des chaudières de cette capacité en plus forte pression (30 bars). Ces chaudières sont généralement construites en atelier et livrées sur un châssis supportant aussi tous les équipements annexes : ventilateur, pompe alimentaire, armoire électrique de commande et de contrôle, etc.
- **entre 20 et 140 t/h** de production de vapeur, les chaudières sont très généralement à tubes d'eau et à circulation naturelle. Elles sont équipées d'un surchauffeur lorsque la production d'électricité est souhaitée. La gamme de pression s'étend jusqu'à environ 120 bars. Ce sont principalement des chaudières "monoblocs" entièrement construites en atelier mais expédiées sans leurs équipements annexes, lesquels sont rapportés sur le site. Lorsque le gabarit exclut le transport monobloc, elles sont construites sur le site à partir d'éléments préfabriqués plus ou moins importants.
- **au delà de 140 t/h**, ce sont, le plus souvent des chaudières à circulation naturelle, équipées d'un surchauffeur, construites à l'unité et entièrement assemblées sur le site. Avec une pression inférieure à 25 bars, le choix peut se faire entre une chaudière à tubes de fumées et une chaudière à tubes d'eau. La chaudière à tubes de fumées est d'un prix nettement inférieur (la différence peut facilement aller du simple ou double). Toutefois, son grand volume d'eau impose d'avoir un local indépendant pour chaufferie. Une chaudière à tubes d'eau, en revanche, ne nécessite pas de chaufferie complètement indépendante. La chaudière à tubes de fumées est soumise à des contraintes plus sévères que la chaudière à tubes d'eau avec, pour corollaire, une fiabilité et une durée de vie plus faible. Sa conception la rend également plus "dangereuse".

Nous présenterons ci-après un nombre nécessairement limité de types de chaudières parmi les plus courants, sans pouvoir prétendre attribuer à cette sélection un quelconque jugement de valeur.

6.1 - CHAUDIERES A TUBES DE FUMEE

Les fumées circulent à l'intérieur des tubes et chauffent (ou évaporent) le fluide caloporteur à l'extérieur des tubes. Selon la configuration, les fumées passent de une à quatre fois avant d'être dégagées vers la cheminée (Photo ci-contre).

Les constructeurs proposent des chaudières à tube de fumées à eau surchauffée, à vapeur ou à vapeur surchauffée d'une puissance de 70 kW à 18 000 kW (ou 250 kg/h à 28 t/h). La pression de fonctionnement va de 1 à 29 bars.



6.2 - CHAUDIERES A TUBES D'EAU

La circulation d'eau se fait dans les tubes et celle des gaz à l'extérieur (voir schéma 7). Pour la production de vapeur dans des petites chaudières à tubes d'eau (15 t/h ou moins), la chaudière est souvent équipée d'un ou de deux ballons.

L'eau d'alimentation est pompée vers le ballon supérieur par la pompe de la chaudière. De là l'eau s'écoule à travers un tube de descente vers le ballon inférieur.

En remontant vers le ballon supérieur, l'eau est chauffée par les fumées et se transforme en un mélange d'eau et de vapeur. La circulation est maintenue par le fait que le mélange eau-vapeur a une température plus élevée donc une densité plus basse que l'eau de retour.

Dans le ballon supérieur, la vapeur est séparée de l'eau et est utilisée soit directement, soit au travers d'un surchauffeur ; l'eau est recyclée et une partie est purgée pour être débarrassée des impuretés et pour maintenir la qualité de l'eau de chaudière. Les chaudières à tubes d'eau sont utilisées pour des puissances importantes. On ne peut guère descendre en-dessous de 1t/h de vapeur.

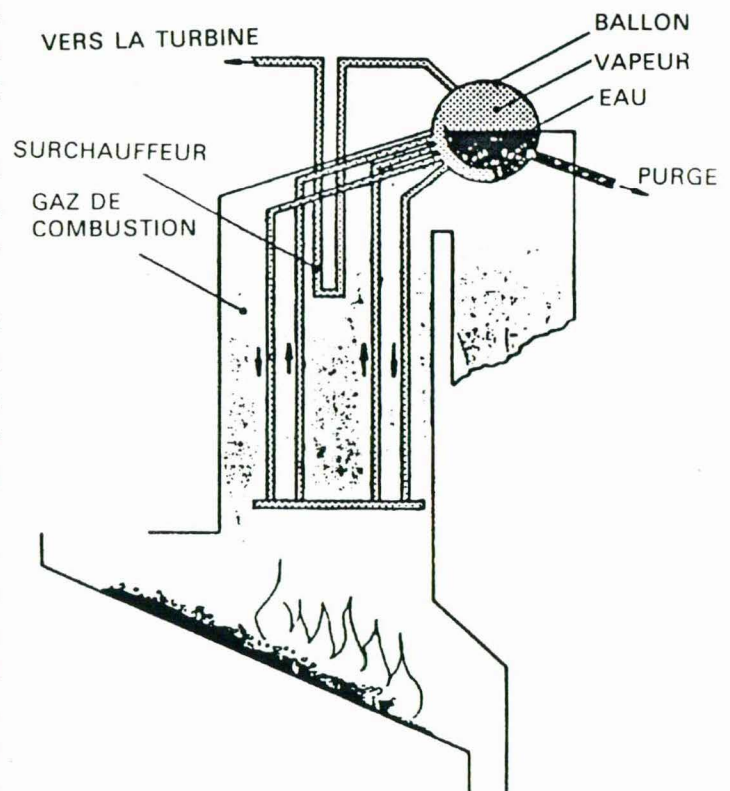


Schéma 7 : Chaudières à tubes d'eau

6.3 - LA CHAUDIERE MIXTE

Compromis entre les deux précédents types, elle est adoptée lorsque le foyer ne peut être intégré dans la chaudière à tubes de fumées. Elle comporte en effet une chambre de combustion refroidie

par écrans et placée juste au-dessus du foyer et un réservoir à tubes de fumées où s'effectuent les échanges par convection, jouant ainsi le rôle de récupérateur de la chaleur sensible des fumées.

6.4 - CRITERES DE CHOIX ENTRE LES DIFFERENTS TYPES

Il est bien préférable d'avoir un foyer intégré dans la chaudière pour avoir un ensemble plus compact et pouvoir permettre les échanges par rayonnement.

Ce choix préliminaire étant fait, six facteurs principaux sont alors à prendre en considération :

6.4.1 - Caractéristiques du fluide thermique à produire

Seule la chaudière à tubes d'eau peut permettre d'aller au-delà d'une certaine pression de vapeur, cette valeur limite pour la chaudière à tubes de fumées variant d'un constructeur à l'autre. Par contre, la chaudière à tubes de fumées se prête mieux à la génération d'eau chaude.

6.4.2 - Foyer adopté pour brûler le combustible

Les foyers permettant de brûler des combustibles peu ou non conditionnés et les foyers à combustion en suspension nécessitent une chambre de combustion et ainsi, une chaudière mixte ou à tubes d'eau pour éviter les usures par érosion. Par contre, les foyers à pyrolyse qui libèrent un gaz propre s'associent très bien à une chaudière à tubes de fumées.

6.4.3 - Puissance de la chaudière

Le volume spécifique plus important des fumées libérées par la combustion du bois et les risques d'érosion par les envols limitent à une puissance plus réduite qu'avec les autres combustibles les possibilités de la chaudière à tubes de fumées.

6.4.4 - Encombrement

La chaudière à tubes d'eau demande un bâtiment plus haut mais une surface moindre en plan que la chaudière à tubes de fumées.

6.4.5 - Coût

Dans son domaine habituel d'utilisation, le coût de construction de la chaudière à tubes de fumées est inférieur à celui de la chaudière à tubes d'eau, de même puissance.

6.4.6 - Frais d'exploitation

Rendement sans récupérateur : la chaudière à tube de fumées a une efficacité supérieure à la chaudière à tubes d'eau lorsque les surfaces sont propres, mais, la chaudière à tubes de fumées n'est en général nettoyée qu'à l'arrêt et périodiquement alors que les surfaces de la chaudière à tubes d'eau peuvent être soufflées fréquemment et en marche.

Le rendement peut être augmenté par l'adjonction d'un économiseur ou si le combustible est

humide par son séchage ou de réchauffage de l'air de combustion par les fumées sortant de la chaudière.

6.4.6.1 - *Puissance absorbée*

Les vitesses plus élevées dans la chaudière à tubes de fumées rendues nécessaires pour éviter l'encrassement conduisent à une perte de charge plus importante et par conséquent à une puissance électrique absorbée plus grande par l'accélérateur de tirage.

6.4.6.2 - *Entretien des fumisteries*

Avec l'adoption de tubes jointifs ou de panneaux membrane sur les parois, les fumisteries ont disparu sur la plupart des chaudières à tubes d'eau.

La tendance est la même pour les chambres de combustion des chaudières mixtes et l'entretien des fumisteries qui se limite à celui du foyer n'est plus un critère de choix du type de chaudière. Cette liste de considération non limitée montre qu'il est toujours possible, dans chaque cas, de faire le choix optimum du générateur convenant le mieux à l'installation projetée et c'est d'ailleurs ce que font les constructeurs capables de fournir les 3 types de générateurs.